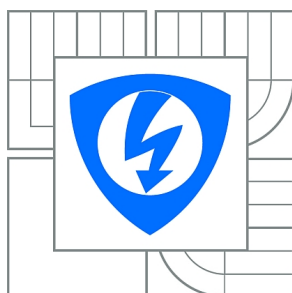




**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

# **NEKASKÁDNÍ FILTRY VYŠŠÍCH ŘÁDŮ S VÍCEVÝSTUPOVÝMI PROUDOVÝMI ZRCADLY**

HIGHER-ORDER NON-CASCADE FILTERS USING MULTI-OUTPUT CURRENT MIRROR

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**JIŘÍ HABR**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. IVO LATTENBERG, Ph.D.**

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Teleinformatika**

**Student:** Jiří Habr

**ID:** 119417

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2010/2011

## NÁZEV TÉMATU:

**Nekaskádní filtry vyšších řádů s vícevýstupovými proudovými zrcadly**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte strukturu nekaskádních filtrů typu dolní, horní a pásmová propust 5. řádu s proudovými prvky CMI, GCMI či vícevýstupové MO-CMI. Navrženou strukturu simulujte pomocí simulačního programu MicroCap. Pro simulaci proudového zrcadla zvolte vhodný náhradní model. Zaměřte se zejména na frekvenční závislosti proudového přenosu na kmitočku a vstupní a výstupní impedanci. Proveďte zhodnocení, které parazitní vlastnosti modelu způsobují které deformace charakteristik oproti ideálnímu modelu. Navrhněte hodnoty součástek pro mezní kmitočty 10 MHz. Proveďte optimalizaci z hlediska dynamického rozsahu. Výstupy zpracujte do přehledných grafů a proveďte hodnocení.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] VRBA, K., VRBA, K. Technika analogových obvodů a systémů, Skripta FEI VUT v Brně, Brno, 1987
- [2] HÁJEK, K., SEDLÁČEK, J. Kmitočtové filtry. Nakladatelství BEN - technická literatura, Praha 2002, 529 stran, ISBN 80-7300-023-7.
- [3] BIOLEK, D. Řešíme elektronické obvody, BEN, 2004, ISBN 80-7300-125-X

**Termín zadání:** 7.2.2011

**Termín odevzdání:** 2.6.2011

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Ivo Lattenberg, Ph.D.

**prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.**  
*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem kmitočtových filtrů s využitím aktivních proudových prvků. První část je věnována teorii kmitočtových filtrů. Další část se zabývá návrhem konkrétních obvodů s aktivními proudovými prvky a jejich simulace ve vhodném programu.

## **Klíčová slova**

Kmitočtový filtr, dolní propust, proudové prvky

## **Abstract**

This thesis describes the design of frequency filters using active current elements. First section is devoted to the theory of frequency filters. Next part deals with specific circuits with active elements and their jet simulation in the appropriate program.

## **Keywords**

Frequency filter, low pass, current elements

## Poděkování

Děkuji všem lidem, kteří mě byli nápomocni při tvorbě semestrálního projektu.

Především děkuji vedoucímu mé semestrální práce doc. Ing. Ivo Lattenberg, Ph.D. za jeho trpělivost a cenné rady při tvorbě technických dokumentů.

## Prohlášení

Prohlašuji, že svůj semestrální projekt na téma Nekaskádní filtry vyšších řádů s vícevýstupovými proudovými zrcadly jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedeného semestrálního projektu dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 2. 6. 2011

.....

podpis autora

### **Bibliografická citace**

HABR, J. *Nekaskádní filtry vyšších řádů s vícevýstupovými proudovými zrcadly*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 41 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ivo Lattenberg, Ph.D..

## Obsah

1	Základní typy filtrů :	10
1.1	Selektivní filtry	10
1.1.1	Dolní propust (DP)	10
1.1.2	Horní propust(HP)	11
1.1.3	Pásmová propust(PP)	12
1.1.4	Pásmová zádrž (PZ)	12
1.2	korekční filtry	13
1.3	Zpožďovací (fázovací) obvody	13
1.4	Typy filtrů podle stavebních prvků[2]:	14
2	Filtry vyšších řádů ARC:	15
2.1	Filtry ARC s nekaskádním spojováním bloků 1. a 2. Řádu	15
2.1.1	Principy nekaskádní realizace	15
2.1.2	Typy těchto nekaskádních zapojení dělíme na čtyři skupiny:	16
2.2	Filtry ARC s kaskádním řazením bloků 1. a 2 řádu	17
2.2.1	Princip kaskádní realizace	17
3	Filtry vyšších řádů RLC	18
4	Druhy pracovních módů	19
4.1	Napěťový mód	19
4.2	Proudový mód	20
4.3	Smíšený mód	20
5	Konvejory	21
5.1	Znamé proudové konvejory a jejich zkratky:	21
5.2	Znamé napěťové konvejory a jejich zkratky:	21
6	Aktivní proudové prvky CMI, GCMi a MCMi	21
6.1	Prvek CMI (Current Mirror and Inverter)	22
6.2	Proudový prvek MCMi (Multiple-output Current Mirror and Inverter)	23
6.3	Proudový prvek GCMi (Generalized Current Mirror and Inverter)	24
7	Návrh vlastních obvodů:	25
7.1	Dolní propust 5 řádu:	26
7.1.1	Přenosová funkce daného obvodu generovaná pomocí programu Snap[7]:	28
7.2	Horní propust 5 řádu:	31
7.2.1	Přenosová funkce daného obvodu generovaná pomocí programu Snap[7]:	32
7.3	Pásmová propust:	35
7.3.1	Přenosová funkce daného obvodu generovaná pomocí programu Snap[7]:	36

8	Závěr: .....	39
9	Seznam použité literatury:.....	40

## Seznam obrázků:

Obr. 1	dolní propust.....	10
Obr. 2	přenos ideální dolní propust .....	10
Obr. 3	horní propust.....	11
Obr. 4	přenos ideální horní propust .....	11
Obr. 5	pásmová propust.....	12
Obr. 6	přenos ideální pásmová propust.....	12
Obr. 7	pásmová zádrž .....	12
Obr. 8	přenos ideální pásmová zádrž.....	13
Obr. 9	korekční filtr .....	13
Obr. 10	Blokové schéma Follow-the-leader feedback.....	16
Obr. 11	článek L .....	18
Obr. 12	článek I .....	18
Obr. 13	článek T .....	19
Obr. 14	článek II.....	19
Obr. 15	napěťový mód.....	20
Obr. 16	proudový mód.....	20
Obr. 17	a) Schématická značka CMI, b) Reprezentace CMI pomocí CCCS.....	23
Obr. 18	a) Schématická značka MCMI, b) Realizace MCMI pomocí UCC .....	24
Obr. 19	Schématická značka GCMI .....	24
Obr. 20	náhradní model CMI.....	25
Obr. 21	Schéma zapojení dolní propust 5.řádu.....	26
Obr. 22	graf dolní propust 5.řádu .....	29
Obr. 23	Graf dolní propust s parazitními prvky.....	30
Obr. 24	Schéma zapojení horní propust 5.řádu.....	31
Obr. 25	Graf horní propust 5.řádu .....	33
Obr. 26	Graf horní propust 5.řádu s parazitními prvky .....	34
Obr. 27	Schéma zapojení pásmová propust.....	35
Obr. 28	Graf pásmová propust.....	37
Obr. 29	Graf pásmová propust.....	38

## Seznam tabulek:

Tab. 1	Varianty hodnoty proudového prvku CMI .....	22
Tab. 2	Koeficienty přenosové funkce aproximované dle Butterwortha[2]:.....	27



# SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN, SYMBOLŮ A ZKRATEK:

Y	Napěťový vstup prvku UCC
X	Nízkoimpedanční vstup prvku UCC
Z	Proudové výstupy prvku UCC
ARC	Struktura realizovaná rezistory, kapacitory a aktivními prvky
B	Šířka přenosového pásma
C	Kapacitor
CM	Proudový mód
CMI	Current Mirror and Inverter, proudové zrcadlo a invertor
MCMI	Multiple-output Current Mirror and Inverter
GCMi	Generalized Current Mirror and Inverter
D	Jmenovatel obecné přenosové funkce
DP	Dolní propust
FLF	Follow-the-leader feedback, typ nekaskádního způsobu zapojení filtru
$\Omega$	Jednotka odporu
HP	Horní propust
I	Proud
U	napětí
$K_i$	Přenos proudu
$K(p)$	Modul přenosu
L	Induktor
LF	Leap-frog, typ nekaskádního způsobu zapojení filtru
MCMI	Multi-output Current Mirror and Inverter, několikanásobný CMI
OTA	transimpedanční zesilovač
PP	Pásmová propust
PZ	Pásmová zádrž
Q	Činitel jakosti
R	Rezistor
RC	Struktura realizovaná rezistory a kapacitory
RLC	Struktura realizovaná rezistory, kapacitory a induktory
UCC	Univerzální proudový konvektor
VM	Napěťový mód

$\tau$	Časová konstanta
$U_X$	napětí na bráně X
$U_Y$	napětí na bráně Y
$U_Z$	napětí na bráně Z
$I_X$	proud na bráně X
$I_Y$	proud na bráně Y
$I_Z$	proud na bráně Z
$u_{\text{výst}}$	výstupní napětí
$u_{\text{vst}}$	vstupní napětí
$f$	frekvence
$u_2$	výstupní napětí
$u_1$	vstupní napětí
$K(s)$	přenosová funkce
$F_m$	mezní kmitočet

## ÚVOD

Kmitočtové filtry můžeme definovat jako lineární obvody, které našly uplatnění v mnoha odvětvích elektrotechniky a elektroniky např. radiotechnice, elektroakustice, telekomunikacích a také v oblasti měřicí techniky. Hlavním úkolem kmitočtových filtrů je změna vstupního signálu procházející skrz daný filtr. Známe různé druhy filtrů, některé propouští kmitočtové složky bez ovlivnění, této oblasti říkáme propustné pásmo, a jiné kmitočtové složky naopak potlačuje a takovou oblast nazýváme pásmo potlačení nebo nepropustné pásmo. Vlastnosti kmitočtových filtrů vyjadřujeme modulovou (amplitudovou) charakteristikou (závislost přenosu napětí či proudu na kmitočtu) a argumentovou charakteristikou (závislost posuvu fáze na kmitočtu). Díky vývoji se filtry stále zdokonalují a proto dříve výhradně využívané filtry pracující v napěťovém módu, kde veškeré vstupní a výstupní hodnoty byly řízeny napětím tolik nevyužívají. V dnešní době se stále více rozšiřují filtry pracující v proudovém módu, kde se veškeré vstupní a výstupní hodnoty řídí proudem. Kmitočtové filtry v proudovém módu se využívají díky lepším vlastnostem. Mají lepší odstup "signál- šum", a dá se s nimi pracovat s vyššími frekvencemi. V této práci se budu zabývat návrhem nekaskádních filtrů vyšších řádů. Za úkol mám vytvořit dolní, horní a pásmovou propust 5. řádu s proudovými prvky buď CMI, GCMi nebo MO-CMI na mezní frekvenci  $F_m=10\text{MHz}$ .

# 1 ZÁKLADNÍ TYPY FILTRŮ :

## 1.1 Selektivní filtry

Tyto filtry potlačují přenos kmitočtových složek signálu v nepropustném pásmu. Rozlišujeme tyto různé filtry [1]:

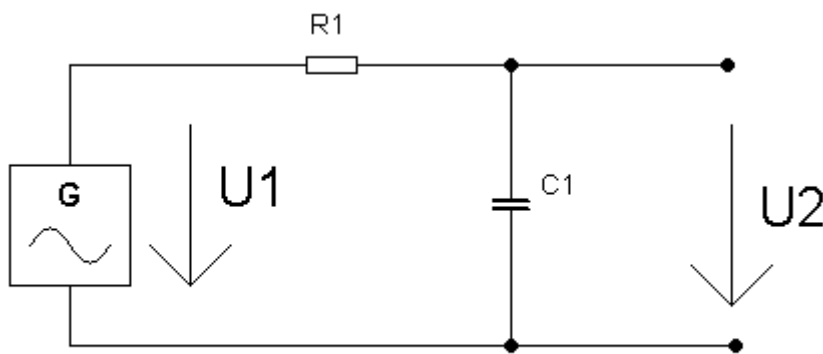
### 1.1.1 Dolní propust (DP)

propouští složky signálu s kmitočty nižšími než mezní kmitočet  $F_M$ .

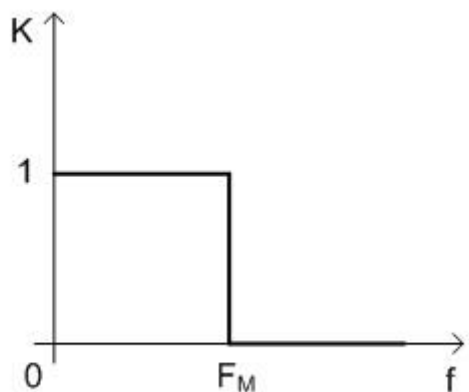
**Přenosová funkce :**

$$\bar{K}(j\omega) = -\frac{I_2(j\omega)}{I_1(j\omega)} = \frac{1/RC}{j\omega + 1/RC} = \frac{\omega_0}{p + \omega_0} \quad (1.1)$$

Kde  $\omega_0 = 1/(RC) = 1/\tau$  ( $\tau$  je časová konstanta)



*Obr. 1 dolní propust*



*Obr. 2 přenos ideální dolní propust*

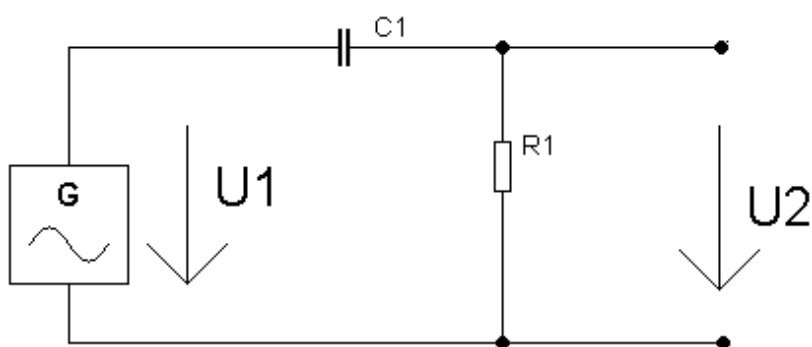
### 1.1.2 Horní propust(HP)

propouští složky signálu o kmitočtech vyšších než je mezní kmitočet  $F_M$ .

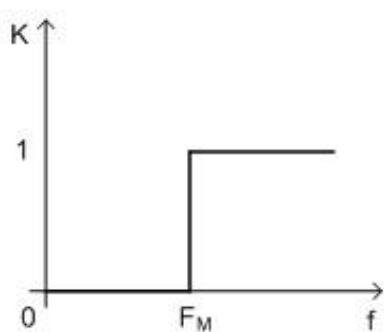
**Přenosová funkce:**

$$\bar{K}(j\omega) = -\frac{I_2(j\omega)}{I_1(j\omega)} = \frac{j\omega}{j\omega + 1/RC} = \frac{p}{p + \omega_0} \quad (1.2)$$

Kde  $\omega_0 = 1/(RC) = 1/\tau$  ( $\tau$  je časová konstanta)



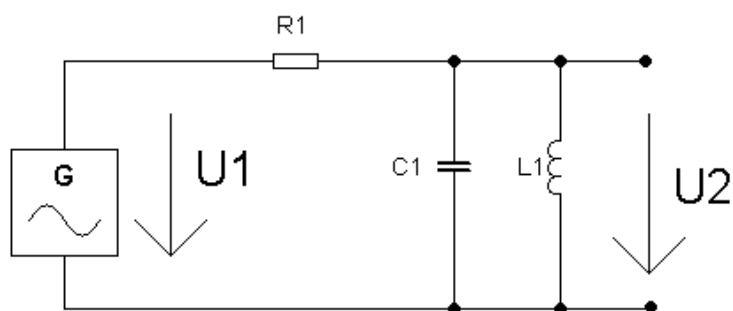
*Obr. 3 horní propust*



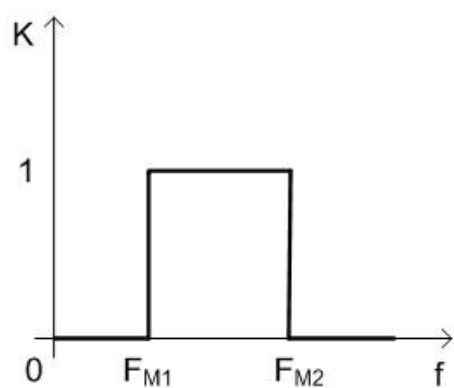
*Obr. 4 přenos ideální horní propust*

### 1.1.3 Pásmová propust(PP)

propouští složky signálu mezi mezním dolním a horním kmitočtem  $F_{M1}$  a  $F_{M2}$ .



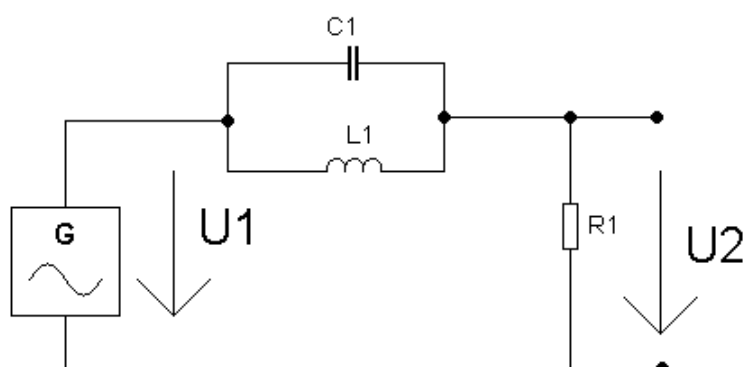
Obr. 5 pásmová propust



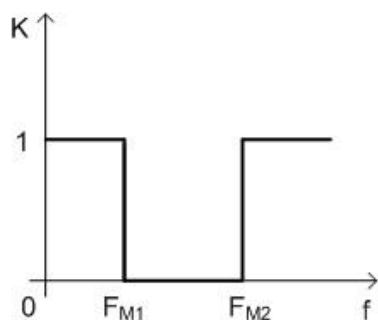
Obr. 6 přenos ideální pásmová propust

### 1.1.4 Pásmová zadrž (PZ)

nepropouští složky signálu mezi mezním dolním a horním kmitočtem  $F_{M1}$  a  $F_{M2}$ .



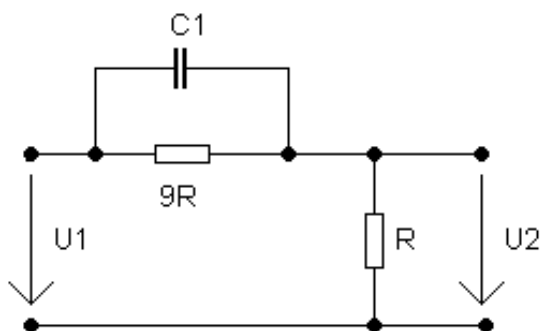
Obr. 7 pásmová zadrž



Obr. 8 přenos ideální pásmová zádrž

## 1.2 korekční filtry

Hlavním úkolem korekčních filtrů je kmitočtová závislost přenosu  $\mathbf{K}_2$ , která řídí přenos některých bloků přenosového řetězce  $\mathbf{K}_1$ , tak aby modul přenosu celé soustavy  $\mathbf{K}$  byl kmitočtově nezávislý. Dobře viditelné je to v případě přenosů v logaritmické ose (v dB), kdy součtem jednotlivých bloků spojených do kaskády nám vyjde výsledný přenos obvodu [2].



Obr. 9 korekční filtr

Příklad korektoru RC nízkých kmitočtů pro  $k=0,1$ ;  $C=1/(1,8 \times \pi^2 \times R F_0)$

## 1.3 Zpožďovací (fázovací) obvody

**Přenosová funkce[1]:**

$$\bar{K}(j\omega) = -\frac{I2(j\omega)}{I1(j\omega)} = \frac{-R + 1/j\omega C}{R + 1/j\omega C} = \frac{-p + \omega 0}{p + \omega 0} \quad (1.3)$$

Vlastnosti dvou předchozích skupin filtrů, selektivních a korekčních, spočívá především v modulové charakteristice a průběh fázové charakteristiky je méně důležitý. Naopak pro zpožďovací fázovací obvody je jako nejdůležitější vyjádření vlastností obvodu kmitočtově závislá fázová charakteristika. Kmitočtová charakteristika fázovacích obvodů je

kmitočtově nezávislá (jsou všepropustné – allpass).[5] Využíváme je tam, kde potřebujeme v závislosti na kmitočtu a bez změny modulu přenosu dosáhnout různého fázového posuvu.

## 1.4 Typy filtrů podle stavebních prvků[2]:

- 1) RC filtry jsou známy svou jednoduchostí, dostupností a poměrně nízkou cenou základních stavebních součástek rezistorů a kondenzátorů. Jejich praktické využití jsou pouze jednoduché filtry prvního a druhého řádu s nízkým činitelem jakosti ( $Q < 0,5$ ).
- 2) RLC filtry s těmito třemi součástkami se dá teoreticky realizovat jakýkoliv typ filtru. Jejich omezení je především v použití cívek, jelikož pro nízké kmitočty jsou potřeba velké hodnoty  $L$  je realizace rozměrná, ztrátová a drahá. Tyto filtry využíváme v kmitočtovém rozsahu od 100kHz do 300Mhz.
- 3) Mikrovlnné filtry jsou to filtry RLC pracující v oblasti mikrovln ( $f > 300\text{MHz}$ ). V těchto případech už nejdou využít prvky ( $R, L, C$ ), ale používají se vlnovody, mikropásková vedení, koaxiální vedení.
- 4) ARC filtry (jsou známé taky jako aktivní RC), které svým principem nahrazují filtry RLC. Hlavními součástkami jsou rezistory a kondenzátory a operační zesilovače (aktivní prvky). Tyto filtry využíváme nejčastěji v kmitočtovém pásmu od 0,1Hz až 100kHz. Kmitočtově jsou vhodné jako doplněk k filtrům RLC, jelikož současný pokrok v technologii dává možnost tyto filtry využívat stále na vyšších kmitočtech. Výhoda oproti filtrům RLC je v jednodušší nastavitelnosti změnou hodnot odporů, naopak hlavní jejich nevýhodou je potřeba napájení jejich aktivních prvků.
- 5) ASC filtry jsou speciální modifikací filtrů ARC a známé také jako filtry se spínanými kapacitami. V porovnání s filtry ARC je jejich výhodou možnost snadné monolitické integrace. Ovšem díky spínání jsou tyto filtry více kmitočtově omezeny než filtry ARC a mají problémy s vyšším driftem, s určitým průnikem spínacího signálu do užitečného signálu.
- 6) Elektromechanické filtry byly první integrované filtry. Principem jejich fungování je převod elektrického signálu na mechanický a využití mechanické rezonance a zpětného převodu výsledného mechanického signálu na elektrický. Můžeme o nich říct, že svou funkcí připomínají pásmové propusti. Dělíme je podle typu



mechanického rezonátoru do skupin. V minulosti se používaly magnetostrikční filtry a v dnešní době se používají převážně piezoelektrické filtry .

- 7) PAV filtry patří mezi integrované filtry. Pracují na principu vyzařování, šíření a fázového kmitočtově závislého skládání povrchových akustických vln. Výroba probíhá nanesením piezoelektrických zářičů na nosnou keramickou destičku. Výsledná funkce a tvar je jako dvě Yagiho antény. Těmito filtry se dají sestavit širokopásmovější obvody než tomu je u filtrů elektromechanických. Využíváme je jako obrazové mezifrekvenční filtry v televizorech. Jejich nevýhoda je v omezení vyšším průchozím útlumem.
- 8) CCD filtry (charge coupled device- nábojově vázané obvody) jsou speciální filtry s časově diskrétním charakterem. Spočívá v postupném posuvu a fázově závislém sčítání jednotlivých „nábojových vzorků“, které se využívá např. u televizních kamer.

## **2 FILTRY VYŠŠÍCH ŘÁDŮ ARC:**

### **2.1 Filtry ARC s nekaskádním spojováním bloků 1. a 2. Řádu**

Tyto filtry jsou díky svému složitějšímu postupu při návrhu v běžné praxi méně rozšířené. Při realizaci těchto filtrů využijeme výhody selektivních bloků 1 a 2 řádu. Hlavní výhody této nekaskádní realizace spočívají především[6]:

Mají malou hodnotu citlivostí přenosových vlastností filtrů, které jsou podobné jakou realizace přičkových filtrů RLC a další výhodou těchto filtrů je i realizace filtrů typu PZ s nižší hodnotou činitelů jakosti u jednotlivých bloků [5].

Naopak nevýhody tohoto zapojení spočívají ve složitější realizaci, protože jsou vázány systémem složitějších přenosových vazeb. V důsledku toho je potřeba větší počet OZ a odporů v zapojení k nutnosti používání sumačních zesilovačů. U struktur typu FLF a PRB se projevují horší šumové vlastnosti. Další nevýhodou je složitý způsob návrhu, ale tuto nevýhodu můžeme eliminovat vhodným počítačovým programem.

#### **2.1.1 Principy nekaskádní realizace**

Princip realizace nekaskádních filtrů je v rozšíření přímého kaskádního propojení selektivních bloků o další vazby např. dopředné nebo zpětné. Existuje velké množství způsobů realizací nekaskádního spojování bloků. Známe základní typy realizací[2] :

Follow-the-leader feedback (RLF)

Generalised follow-the-leader feedback (GHLF)

Primary-resonator-block (PRB)

Shifted-companion-form (SCF)

Leap-frog(LF)

Modified leap-frog(MLF)

Coupled biquad (CB)

Inverse RLF (IFLF)

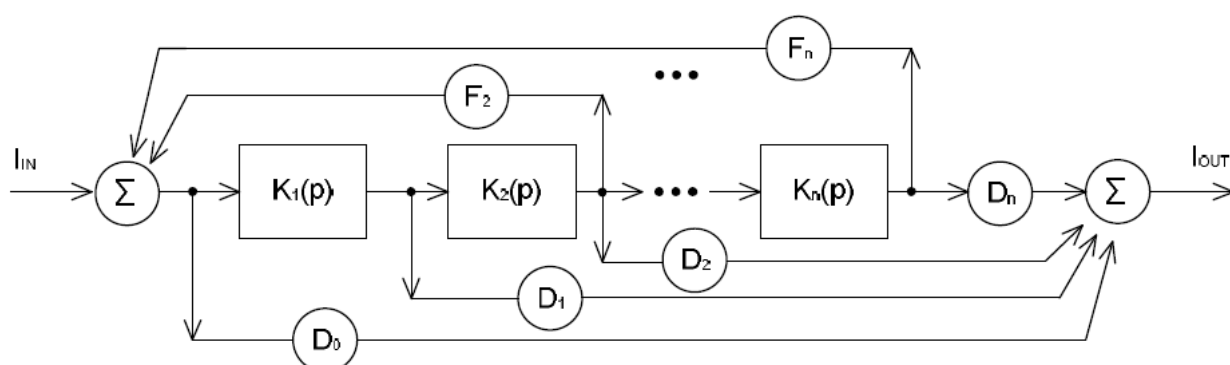
Minimum-sensitivity-feedback (MSF)

### 2.1.2 Typy těchto nekaskádních zapojení dělíme na čtyři skupiny:

První skupina se zpětnovazebními vazbami z výstupů bloků do vstupního sumátoru. Pokud se jedná o realizaci přenosové funkce s nulami je zapojení doplněno dopřednými vazbami do výstupního sumátoru. Do této skupiny patří struktura SCF, PRB nebo RLF. Sumátory a hodnoty zpětnovazebních přenosů  $F$  nebo také dopředných přenosů  $D$  jsou znázorněny kroužky a základní selektivní bloky jsou označeny  $K_1$  až  $K_n$ .

Druhá skupina využívá vazby ob jeden blok. Do této skupiny patří CB,LF,MLF.

Další dvě varianty jsou inverzním uspořádáním zpětných vazeb RLF a kombinací typů vazeb MSB. Nejvíce využívaným zapojením nekaskádních filtrů ARC jsou struktury LF a PRB. Nekaskádní filtry ARC se nejvíce využívají pro zapojení typu pásmová propust, kde se využívají vyšší hodnoty činitelů jakosti a tím vynikne výhoda nižších citlivostí realizace[4].



Obr. 10 Blokové schéma Follow-the-leader feedback

## 2.2 Filtry ARC s kaskádním řazením bloků 1. a 2 řádu

Při realizování těchto filtrů se opět využívá příznivých vlastností selektivních bloků 1. a 2. řádu, díky tomu je toto zapojení hojně využíváno i v praxi.

### Výhody kaskádní realizace:

Jednoduchý návrh filtrů DP a HP a neméně náročný je i návrh typu PP.

Další výhodou je snadné nastavení dynamického poměru (minimální a maximální úroveň signálu).

### Nevýhody těchto filtrů:

Velká citlivost na tolerance hodnot prvků a rozptyl základních parametrů bloků, které se projevují se zvyšováním řádu filtru.

### 2.2.1 Princip kaskádní realizace

Vezmeme přenosovou funkci, kterou libovolně rozložíme na součin dílčích přenosových funkcí 2. popř. 1. řádu. Sudou přenosovou funkci řádu  $n$  realizujeme  $m=n/2$  bloků 2. řádu vyjádříme jako[2]:

$$K(p) = \frac{a_{2m}p^2 + a_{1m}p + a_{0m}}{p^2 + b_{1m}p + b_{0m}} \dots \frac{a_{22}p^2 + a_{12}p + a_{02}}{p^2 + b_{12}p + b_{02}} * \frac{a_{21}p^2 + a_{11}p + a_{01}}{p^2 + b_{11}p + b_{01}}$$

$$= \prod_{i=1}^m \frac{a_{2i}p^2 + a_{1i}p + a_{0i}}{p^2 + p\Omega_{0i}/Q_i + \Omega_{0i}^2} \quad (2.1)$$

U typu filtrů DP a HP je možné použít funkci lichých řádů. Takovou funkci řádu  $n$  realizujeme  $m=(n-1)/2$  bloků 2. řádu a jeden blok 1. řádu tvaru:

$$K(p) = \frac{a_{1(m+1)}p + a_{0(m+1)}}{p + b_{0(m+1)}} * \frac{a_{2m}p^2 + a_{1m}p + a_{0m}}{p^2 + b_{1m}p + b_{0m}}$$

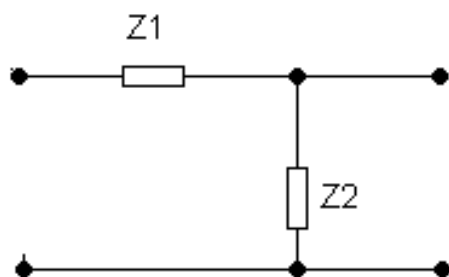
$$= \frac{a_{22}p^2 + a_{12}p + a_{02}}{p^2 + b_{12}p + b_{02}} * \frac{a_{21}p^2 + a_{11}p + a_{01}}{p^2 + b_{11}p + b_{01}} = \frac{a_{1(m+1)}p + a_{0(m+1)}}{p + \Omega_{0(m+1)}} * \prod_{i=1}^m \frac{a_{2i}p^2 + a_{1i}p + a_{0i}}{p^2 + p\Omega_{0i}/Q_i + \Omega_{0i}^2} \quad (2.2)$$

Díky použití komplexního kmitočtu  $p$  jsou v obou vztazích vyjádřeny úhlové kmitočty  $\Omega_{0i}$ . Jmenovatel přenosové funkce jednoznačně určuje hodnoty  $F_{0i}$  a  $Q_i$ . Čítec je v případě

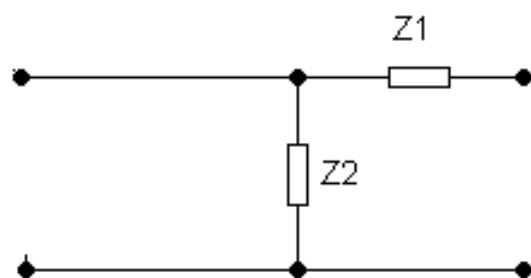
filtrů DP, HP, PP a PZ 2. řádu dán jejich typem, případně koeficientem přenosu  $K_{0i}$ . Koeficient přenosu  $K_{0i}$  v jeho propustném pásmu násobí každý jednotkový přenos bloku a tím násobí i absolutní přenos celého filtru, tím ale nemění tvar výsledné fázové a modulové charakteristiky[3]. Aby jsme zaručili jednotkový přenos  $K_0$ , musí se rovnat výsledný součin 1. Pokud tomu tak není musíme obvod doplnit potřebným zesilovačem s potřebným přenosem. V kaskádní realizaci musíme dbát na pořadí jednotlivých bloků. Ve výsledné přenosové funkci na pořadí nezáleží, ovšem nesprávné řazení může ovlivnit dynamický rozsah přenosu filtru. Nejčastěji se tento problém řeší tím, že se bloky řadí podle velikosti jejich  $Q$  od nejvyšší po nejvyšší.

### 3 FILTRY VYŠŠÍCH ŘÁDŮ RLC

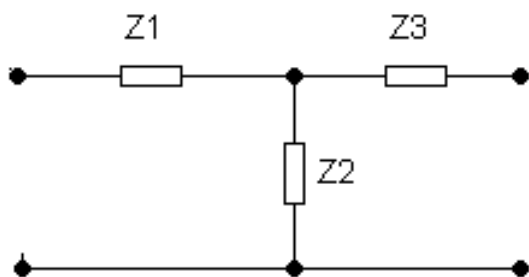
Filtry vyšších řádů RLC jsou používány pro strmější modulové charakteristiky. Zvyšováním počtu induktorů a kapacitou v příčkovém článku získáme požadovanou strmost filtru. Základní články RLC filtrů jsou:



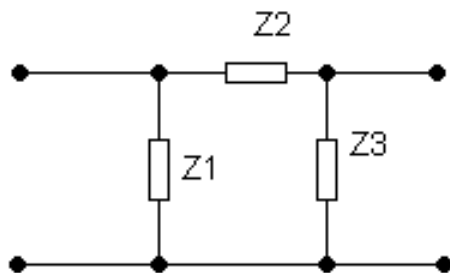
Obr. 11 článek L



Obr. 12 článek I



Obr. 13 článek *T*



Obr. 14 článek *II*

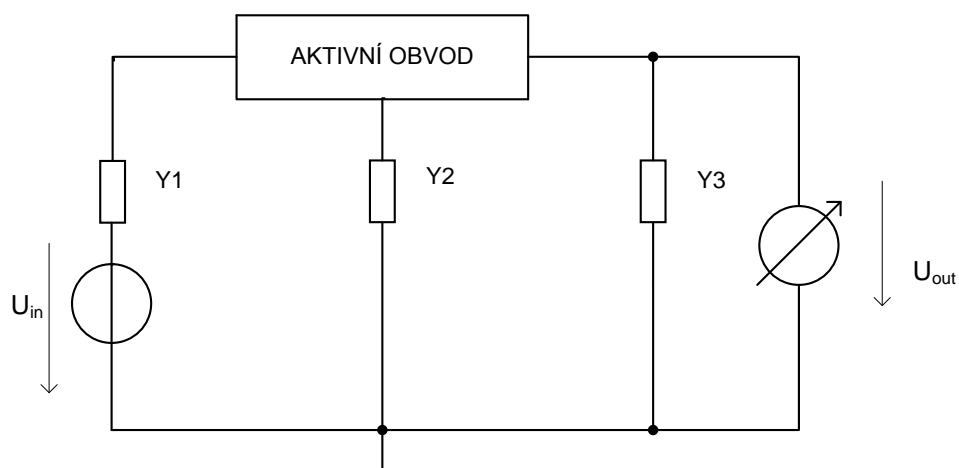
Tyto filtry se charakterizují poměrně lehkou realizací, a také poměrně malou citlivostí těchto příčkových struktur na změny parametrů prvků. Filtry RLC našly široké využití v praxi a to především pro vysokofrekvenční pásma.

## 4 DRUHY PRACOVNÍCH MÓDŮ

Rozdělujeme je do tří módů: napěťový mód, proudový mód a smíšený mód. V současné době se začíná více využívat proudový mód, protože má vyšší dynamiku a potřebuje nižší napájecí napětí.

### 4.1 Napěťový mód

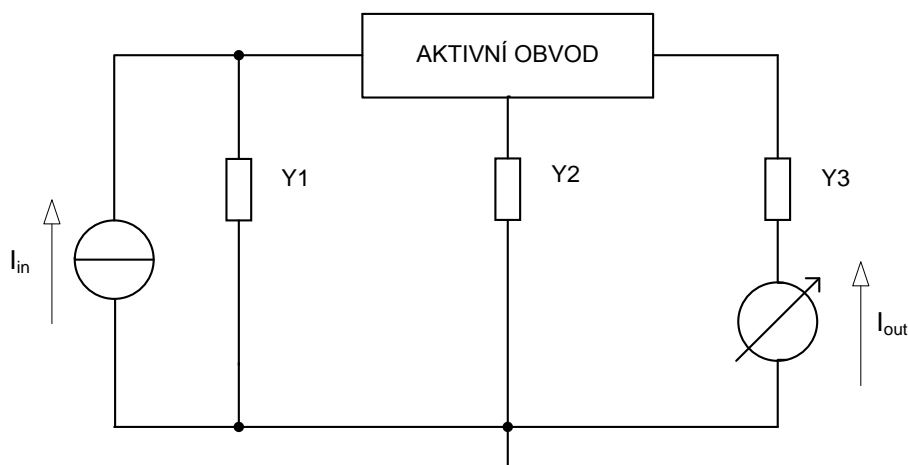
Napěťový mód (Voltage-mode, VM) patří mezi nejpoužívanější pracovní módy, ovšem díky stále snižujícímu napájecímu napětí se začíná využívat převážně proudový nebo smíšený mód. Jako aktivní prvek se zde používá většinou operační zesilovač s vyšším tranzitním kmitočtem. Na vstupu obvodu je napěťové buzení a na výstupu je napětí sledováno[8].



Obr. 15 napěťový mód

## 4.2 Proudový mód

Obvody v proudovém módu (Current-mode, CM) pracují s nižším napájecím napětím a nemají tak velký vliv na dynamický rozsah. Výhodou tohoto módu je vyšší kmitočtové pásmo. Na vstupu obvodu je zapojeno proudové buzení a na výstupu se snímá proudová odezva zapojení.



Obr. 16 proudový mód

## 4.3 Smíšený mód

Tento mód je kombinací obou předchozích kombinací. Pracuje buď v tzv. V/CM, kdy aktivní funkční blok pracuje v módu proudovém, ale celkově zpracovává napěťový signál. Obdobně v obvodě může existovat i duální mód C/VM.

## 5 KONVEJORY

Jsou to moderní aktivní bloky pracující jak v proudovém, tak v napěťovém režimu, který realizují jednotkový přenos proudu nebo napětí mezi jednotlivými bránami, buď kladnou nebo zápornou polaritou. Může pracovat v napěťovém, proudovém nebo smíšeném režimu. Nejčastější proudový konvektor je trojbran, ale známe i jiné mnohobrany [6].

### 5.1 Známé proudové konvektory a jejich zkratky:

GCC- obecný proudový konvektor

CCI- konvektor první generace

ICI- invertující konvektor první generace

CCII- konvektor druhé generace

ICII- invertující konvektor druhé generace

CCIII- konvektor třetí generace

ICIII- invertující konvektor třetí generace

### 5.2 Známé napěťové konvektory a jejich zkratky:

GVC- obecný napěťový konvektor

VCI- konvektor první generace

IVCI- invertující konvektor první generace

VCII – konvektor druhé generace

IVCII- invertující konvektor druhé generace

VCIII- konvektor třetí generace

## 6 AKTIVNÍ PROUDOVÉ PRVKY CMI, GCMÍ A MCMÍ

Dřívější praxe byla zaměřena pouze na návrh a pracování filtrů v napěťovém módu, ale díky technickému vývoji analogové techniky, nových technologií a objevování nových možností, tak se začali filtry řešit jak v módu napěťovém tak i v módu proudovém.

Jak se ukázalo proudový mód skýtá pro nás velmi příznivé podmínky, především se jedná o možnost rozšíření kmitočtového spektra zpracovávaného signálu, jako důležitou vlastností je, že proudový mód nám umožňuje podstatný odstup signálu od šumu i při nižších napětích.

## 6.1 Prvek CMI (Current Mirror and Inverter)

Tento aktivní proudový prvek byl zaveden do praxe se záměrem rozšíření kmitočtového pásma zpracovávaného signálu a přitom zajistit dostatečný odstup signálu od šumu v obvodech analogových kmitočtových filtrů. Tento aktivní proudový prvek vychází ze studie proudových konvektorů. Při bližším popisu tohoto proudového prvku zjistíme, že je tvořen jedním vstupem  $i_1$  a dvojicí výstupů  $i_2$  a  $i_3$ . Nesmíme opomenout i zemnicí výstup, který slouží pro svod rozdílových proudů, které se zde mohou vyskytnout. Branové proudy jsou definovány vztahy:

$i_2$  přivádí na výstup zrcadlený proud ze vstupu, tedy  $i_2 = i_1$

$i_3$  přivádí na výstup invertovaný proud ze vstupu  $i_3 = -i_1$

Je možné, že se funkce na výstupu vymění takže  $i_2$  bude proud invertovaný a proud  $i_3$  bude proud zrcadlený. Proto můžeme předcházející rovnice upravit do konečného tvaru prostřednictvím proudovým přenosových koeficientů  $a$  a  $b$  :

$$i_2 = a * i_1 \quad (6.1)$$

$$i_3 = b * i_1 \quad (6.2)$$

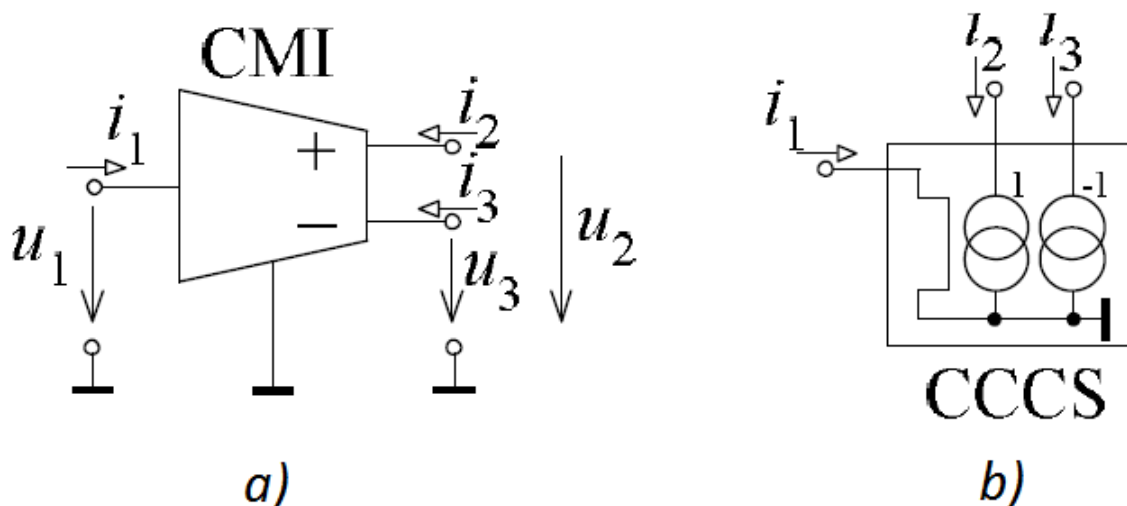
Koeficienty  $a$  a  $b$  budou vždy rovny hodnotě buď 1 nebo -1. Právě hodnoty koeficientů nám určí jaký výstup bude vykonávat zrcadlení či invertování. Počet možných variant tohoto prvku je roven druhé mocnině dvou, tudíž 4 variantám.

Obvod	Hodnota koeficient	Hodnota koeficient
	$a$	$b$
CMI +/+	1	1
CMI +/-	1	-1
CMI -/+	-1	1
CMI -/-	-1	-1

Tab. 1 Varianty hodnoty proudového prvku CMI

Ideální model tohoto prvku lze definovat dvěma zdroji proudu řízeného společným proudem (CCCS).





Obr. 17 a) Schématická značka CMI, b) Reprezentace CMI pomocí CCCS

## 6.2 Proudový prvek MCMI (Multiple-output Current Mirror and Inverter)

Jedná se o univerzální proudový prvek. Tento proudový prvek vychází z předcházejícího proudového prvku CMI, ale na rozdíl od něj má o dva výstupy více, tudíž dojde k navýšení počtu přenosových funkcí:

$$i_2 = a_1 * i_1 \quad (6.3)$$

$$i_3 = b_1 * i_1 \quad (6.4)$$

$$i_4 = a_2 * i_1 \quad (6.5)$$

$$i_5 = b_2 * i_1 \quad (6.6)$$

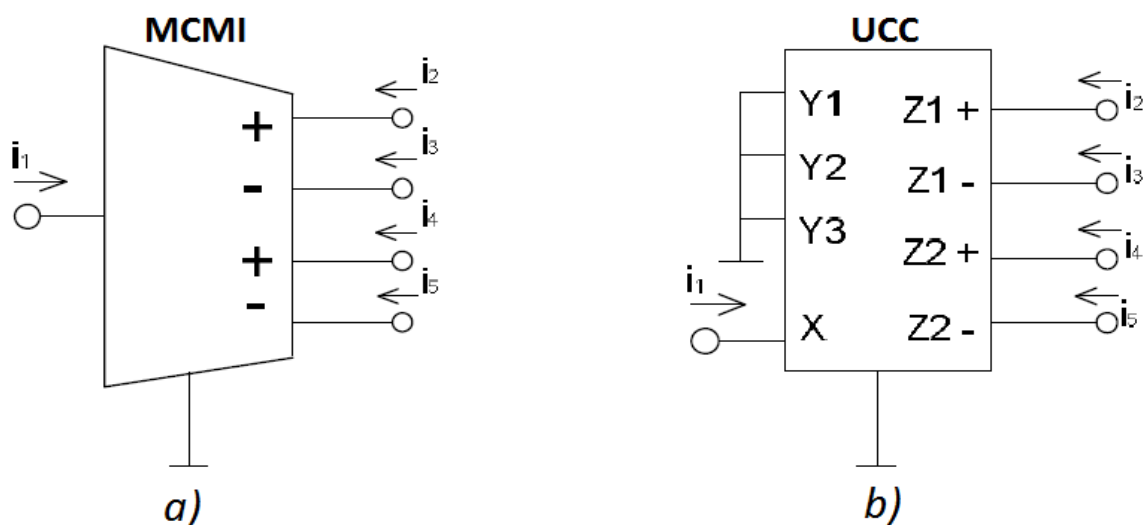
Hodnoty  $a$  a  $b$  mají charakter proudových přenosových koeficientů, u kterých platí:

$$a_1 = a_2 = 1 \quad (6.7)$$

$$b_1 = b_2 = -1 \quad (6.8)$$

Uvedené prvky CMI a MCMI nejsou v současné době dostupné jako integrované obvody, lze však využít principiální shodnosti s univerzálním proudovým konveorem (UCC). V tomto případě je nutné vstupní napěťové brány  $Y$  proudového konveoru uzemnit a využívat pouze

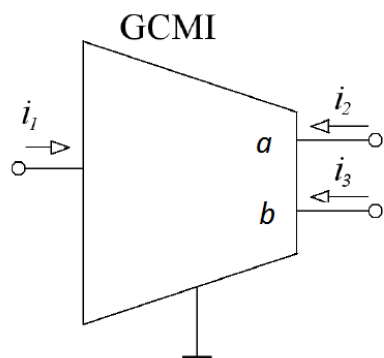
proudové brány X a Z.



Obr. 18 a) Schématická značka MCMI, b) Realizace MCMI pomocí UCC

### 6.3 Proudový prvek GCMI (Generalized Current Mirror and Inverter)

Jedná se o aktivní proudový prvek, který vychází z vlastností CMI prvku. Obvod se chová buď jako proudové zrcadlo a nebo inverter. Obvod tedy na výstup přenesení proud ze vstupu nezměněný (zrcadlo) nebo s opačnou polaritou (inverter). Prvek GCMI pracuje pouze s proudovými veličinami a tím splňuje podmínku pro dosažení čistě proudového módu.



Obr. 19 Schématická značka GCMI

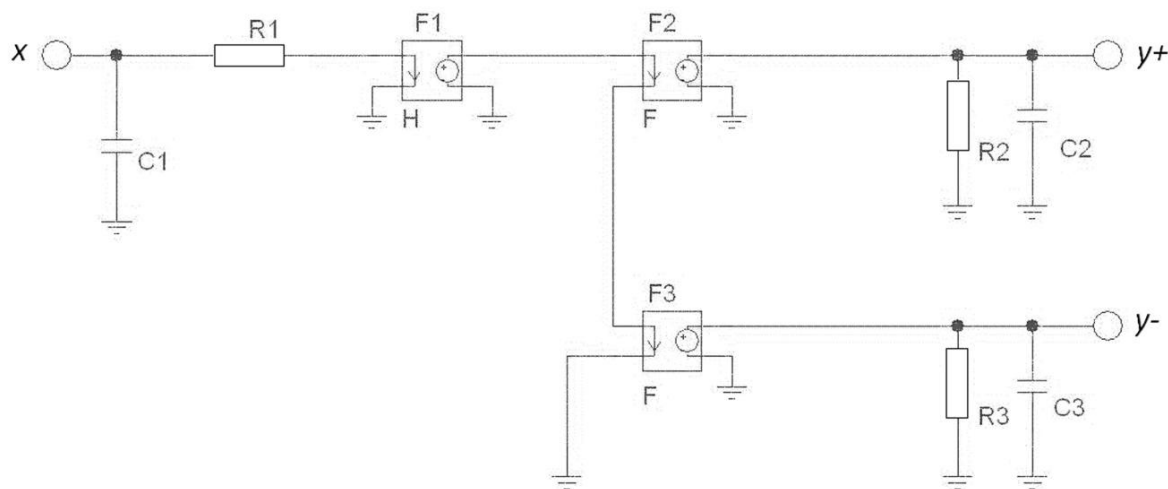
Funkce tohoto obvodu popisují následující rovnice:

$$i_2 = a * i_1 \quad (6.9)$$

$$i_3 = b * i_1 \quad (6.10)$$

Koeficienty  $a$  a  $b$  budou vždy rovny hodnotě buď 1 nebo -1. Právě hodnoty koeficientů nám určí jaký výstup bude vykonávat zrcadlení nebo invertování.

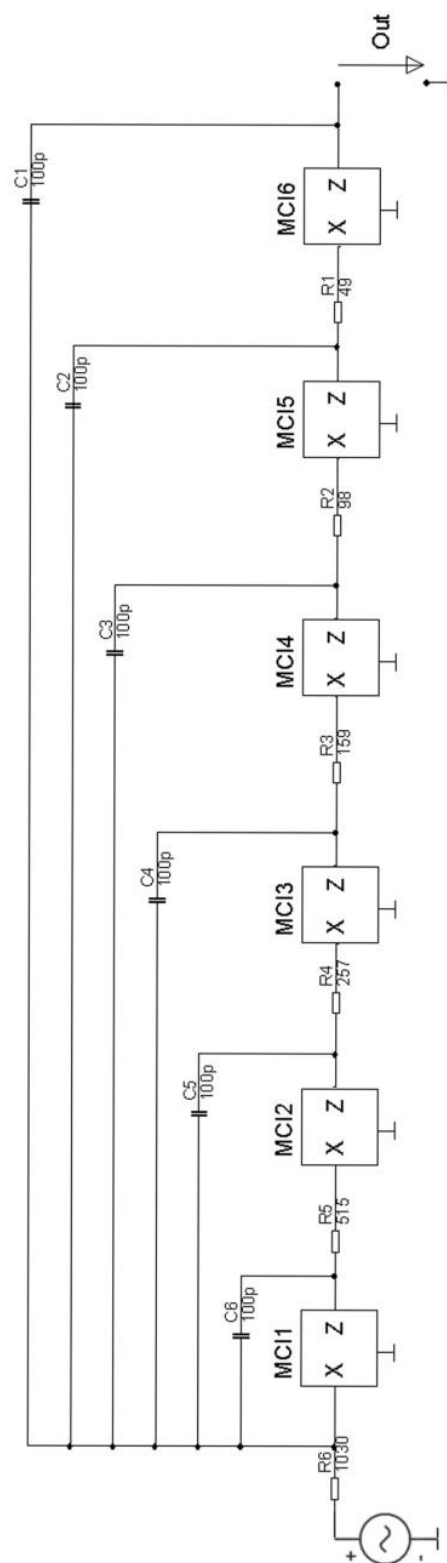
## 7 NÁVRH VLASTNÍCH OBVODŮ:



*Obr. 20 náhradní model CMI*

Tento náhradní model Obr.20 obsahuje bloky F1,F2,F3 což jsou vlastně zdroje proudu řízené proudem,kde blok F1 a blok F3 mají zisk +1 a blok F2 má zisk -1. Kondenzátory C1,C2,C3 v tomto simulačním modelu byli zvoleny 1pF,což odpovídá reálným vlastnostem běžných vstupních a výstupních proudových svorek.Rezistor R1 popisuje vstupní odpor a rezistory R2 a R3 popisují výstupní odpor.Pro vstupní R1 byl zvolen odpor  $1\Omega$  a pro výstupní R2 a R3 byl zvolen odpor  $10M\Omega$ .

### 7.1 Dolní propust 5 řádu:



*Obr. 21 Schéma zapojení dolní propust 5.řádu*

Obvod typu dolní propust, řád filtru  $n=5$  a zadaný mezní kmitočet  $F_m=10\text{Mhz}$ , který jsem realizoval pomocí pasivních prvků R,C a aktivního proudového prvku CMI. Pro výpočet pasivních prvků jsem zvolil Butterworthovu aproximaci, která patří mezi nejpoužívanější, protože je přijatelným kompromisem mezi požadovanou linearitou fázové charakteristiky a dosažitelným útlumem kmitočtové charakteristiky.

### Obecná rovnice přenosové funkce:

$$K(s) = \frac{K_0}{1 + B_1s + B_2s^2 \dots + B_ns^n} \quad (7.1)$$

$B_1 \dots B_n$  jsou to kladné reálné koeficienty mocnin normované komplexní proměnné  $s = p / \omega_m$  a  $K_0$  je přenos filtru.

Tab. 2 Koeficienty přenosové funkce aproximované dle Butterwortha[2]:

n	$B_0$	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$B_5$
1	1	1				
2	1	1,414	1			
3	1	2	2	1		
4	1	2,613	3,414	2,613	1	
5	1	3,236	5,236	5,236	3,236	1

$$R_6 = \frac{B_1}{C * \omega_m} \quad (7.2)$$

$$R_5 = \frac{B_2}{C^2 * R_6 * (\omega_m)^2} \quad (7.3)$$

$$R_4 = \frac{B_3}{C^3 * R_6 * R_5 * (\omega_m)^3} \quad (7.4)$$

$$R_3 = \frac{B_4}{C^4 * R_6 * R_5 * R_4 * (\omega_m)^4} \quad (7.5)$$

$$R_2 = \frac{B_5}{C^5 * R_6 * R_5 * R_4 * R_3 * (\omega_m)^5} \quad (7.6)$$

$$R_1 = \frac{B_5}{C^6 * R_6 * R_5 * R_4 * R_3 * R_2 * (\omega_m)^6} \quad (7.7)$$

### Příklad výpočtu:

$$R_5 = \frac{3,236}{(100E^{-12})^2 * 1030 * (2\pi * 10E^6)^2} = 515\Omega \quad (7.8)$$

Kde úhlový mezní kmitočet je roven  $\omega_m = 2\pi f_m$

Zvolené hodnoty kondenzátorů jsou:  $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = C_6 = 100\text{pF}$ .

Požadovaný mezní kmitočet

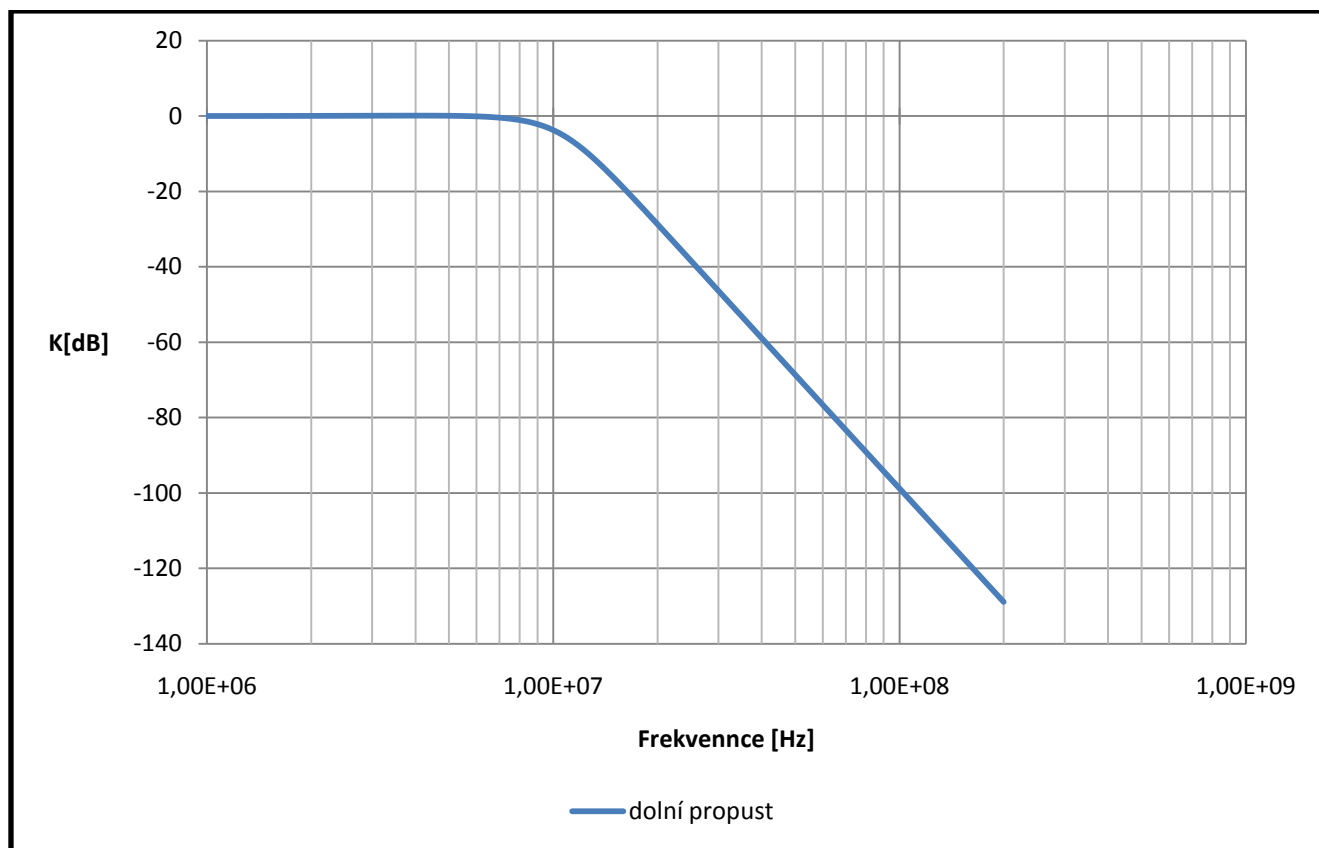
$f_m = 10\text{MHz}$ . K těmto hodnotám byli vypočítané hodnoty rezistorů:

$R_6 = 1030\Omega, R_5 = 515\Omega, R_4 = 257,5\Omega, R_3 = 159,2\Omega, R_2 = 98,4\Omega, R_1 = 49\Omega$

### 7.1.1 Přenosová funkce daného obvodu generovaná pomocí programu Snap[7]:

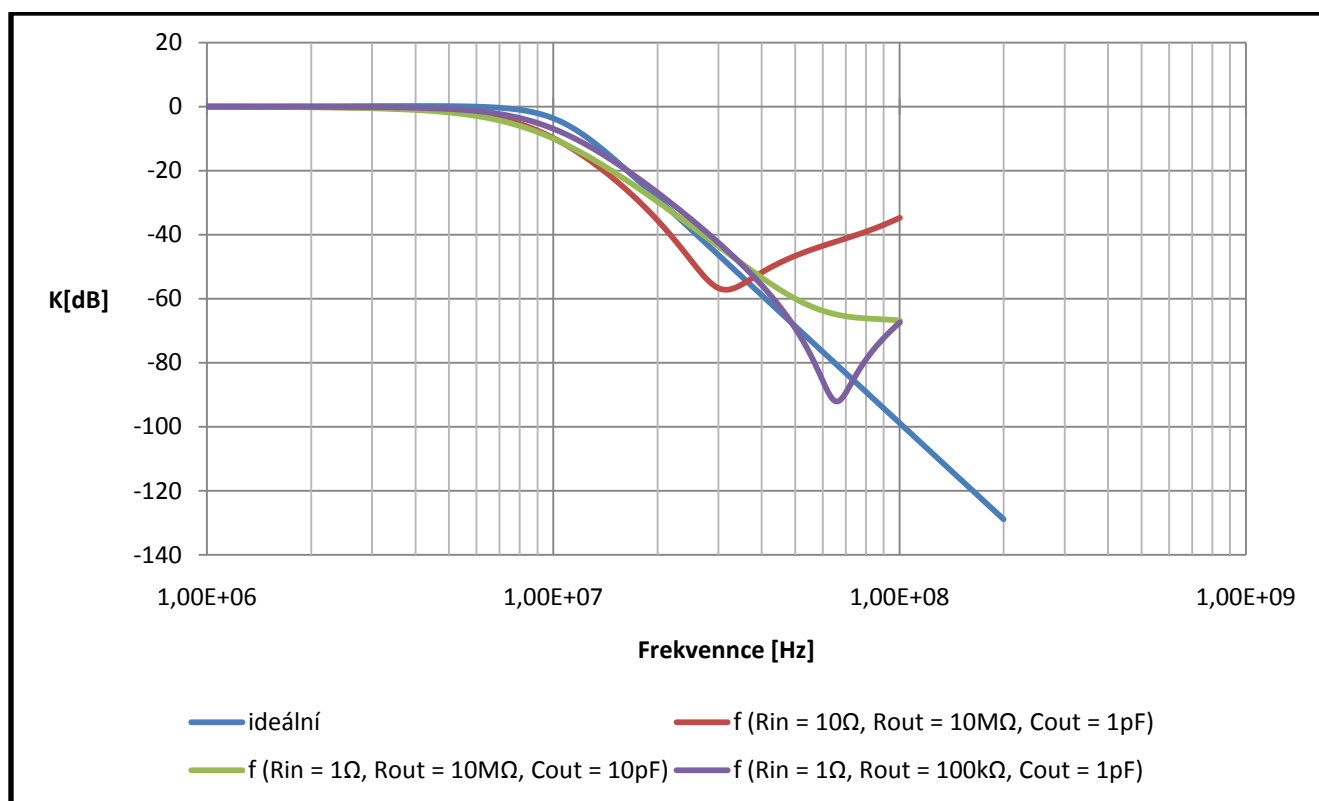
$$\begin{aligned}
 Ki(s) = & \frac{-1}{1 + s * (2 * R_1 * C_2 + 2 * R_3 * C_4 + 2 * R_5 * C_6)} \cdots \\
 & \frac{1}{\cdots + s^2 * (2 * R_3 * R_1 * C_4 * C_2 + 2 * R_5 * R_3 * C_6 * C_4 + 2 * R_3 * R_2 * C_4 * C_3 + 2 * R_5 * \cdots} \\
 & \frac{1}{\cdots * R_1 * C_6 * C_2 + 2 * R_5 * R_2 * C_6 * C_3 + 2 * R_5 * R_4 * C_6 * C_5) \cdots} \\
 & \frac{1}{\cdots + s^3 * (2 * R_3 * R_2 * R_1 * C_4 * C_3 * C_2 + 2 * R_5 * R_3 * R_1 * C_6 * C_4 * C_2 + 2 * R_5 * R_3 * \cdots} \\
 & \frac{1}{\cdots * R_2 * C_6 * C_4 * C_3 + 2 * R_5 * R_4 * R_3 * C_6 * C_5 * C_4 + 2 * R_5 * R_2 * R_1 * C_6 * \cdots} \\
 & \frac{1}{\cdots * C_3 * C_2 + 2 * R_5 * R_4 * R_1 * C_6 * C_5 * C_2 + 2 * R_5 * R_4 * R_2 * C_6 * C_5 * C_3) \cdots} \\
 & \frac{1}{\cdots + s^4 * (2 * R_5 * R_4 * R_2 * R_1 * C_6 * C_5 * C_3 * C_2 + 2 * R_5 * R_3 * R_2 * R_1 * C_6 * C_4 * C_3 * \cdots} \\
 & \frac{1}{\cdots * C_2 + 2 * R_5 * R_4 * R_3 * R_1 * C_6 * C_5 * C_4 * C_2 + 2 * R_5 * R_4 * R_3 * R_2 * C_6 * C_5 * C_4 * C_3) \cdots} \\
 & \frac{1}{\cdots + s^5 * (2 * R_5 * R_4 * R_3 * R_2 * R_1 * C_6 * C_5 * C_4 * C_3 * C_2)} \quad (7.9)
 \end{aligned}$$

Dolní propust 5.řádu jsme podrobili AC analýze v programu Micro Cap. Simulace proběhla v rozsahu kmitočtu od 1MHz do 1GHz. Tímto jsme získali modulovou charakteristiku ideálního zapojení, které jsme nadále rozšířili o parazitní prvky proudového prvku CMI.. Všechny tyto charakteristiky jsem prvně simuloval v programu MicroCap a následně graficky zobrazil v programu Microsoft excel pro lepší znázornění.



Obr. 22 graf dolní propust 5.řádu

Výsledná kmitočtová charakteristika vyšla podle teoretických předpokladů. Výsledný pokles je dán řádem filtru, kde každý z bloků má pokles o 20 dB/dek. Pro naše zapojení, které je zapojeno jako dolní propust 5. řádu je pokles dán  $n \cdot 20 \text{ dB/dek}$ , tudíž výsledný pokles je 100dB/dek. Hodnota mezního kmitočtu  $F_m$  při poklesu o -3dB v tomto případě nabývá hodnoty  $F_m=10 \text{ Mhz}$ .



Obr. 23 Graf dolní propust s parazitními prvky

Na Obr.23 jsou znázorněny kmitočtové charakteristiky obvodu dolní propust s parazitními vlastnostmi aktivního proudového prvku CMI a patrné změny průběhů oproti ideálnímu zapojení dolní propusti 5 řádu. Vstupní parazitního odpor  $R_{in}$  se nám na v konečné kmitočtové charakteristice projeví tak, že se zmenší zesílení oproti ideální  $f_{ci}$ , což je patrné z Obr.23 přenosové funkce  $f(R_{in} = 10\Omega, R_{out} = 10M\Omega, C_{out} = 1pF)$ .  $R_{in}$  má na výslednou přenosovou  $f_{ci}$  z parazitních vlastností prvku CMI největší vliv. Zesílení se vypočítá dle vzorce :

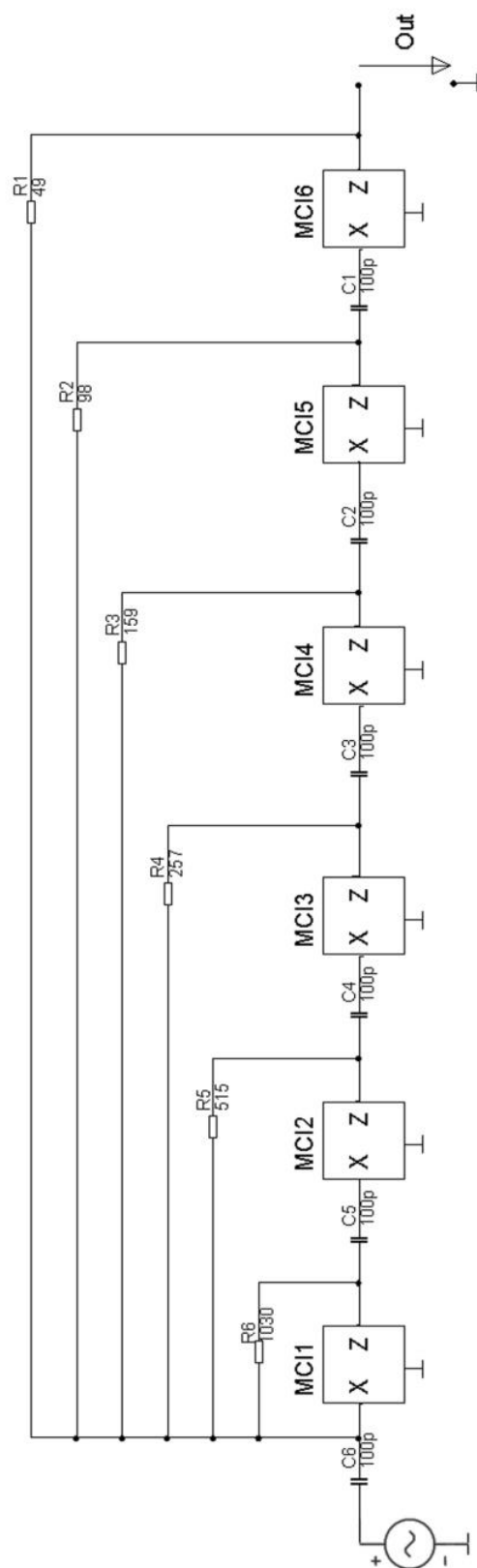
$$K[dB] = \frac{I_{out}[A]}{I_{in}[A]} \quad (7.10)$$

Změna výstupního parazitního odporu  $R_{out}$  se na výsledné charakteristiky, kterou nám Obr.23 znázorňuje funkce  $f(R_{in} = 1\Omega, R_{out} = 100k\Omega, C_{out} = 1pF)$  nějak zvlášť neprojeví a na proto má parazitní  $R_{out}$  nejmenší vliv na výslednou charakteristiku.

Výstupní parazitní kapacita  $C_{out}$  se nám ve výsledné kmitočtové charakteristice na Obr.23 s přenosovou funkcí  $f(R_{in} = 1\Omega, R_{out} = 10M\Omega, C_{out} = 10pF)$  projeví snížením mezní frekvence změnou časové konstanty  $\tau$  (kondenzátor propouští vysoké frekvence). V tomto případě signál o vysokém kmitočtu propouští na zem.



## 7.2 Horní propust 5 řádu:



Obr. 24 Schéma zapojení horní propust 5.řádu

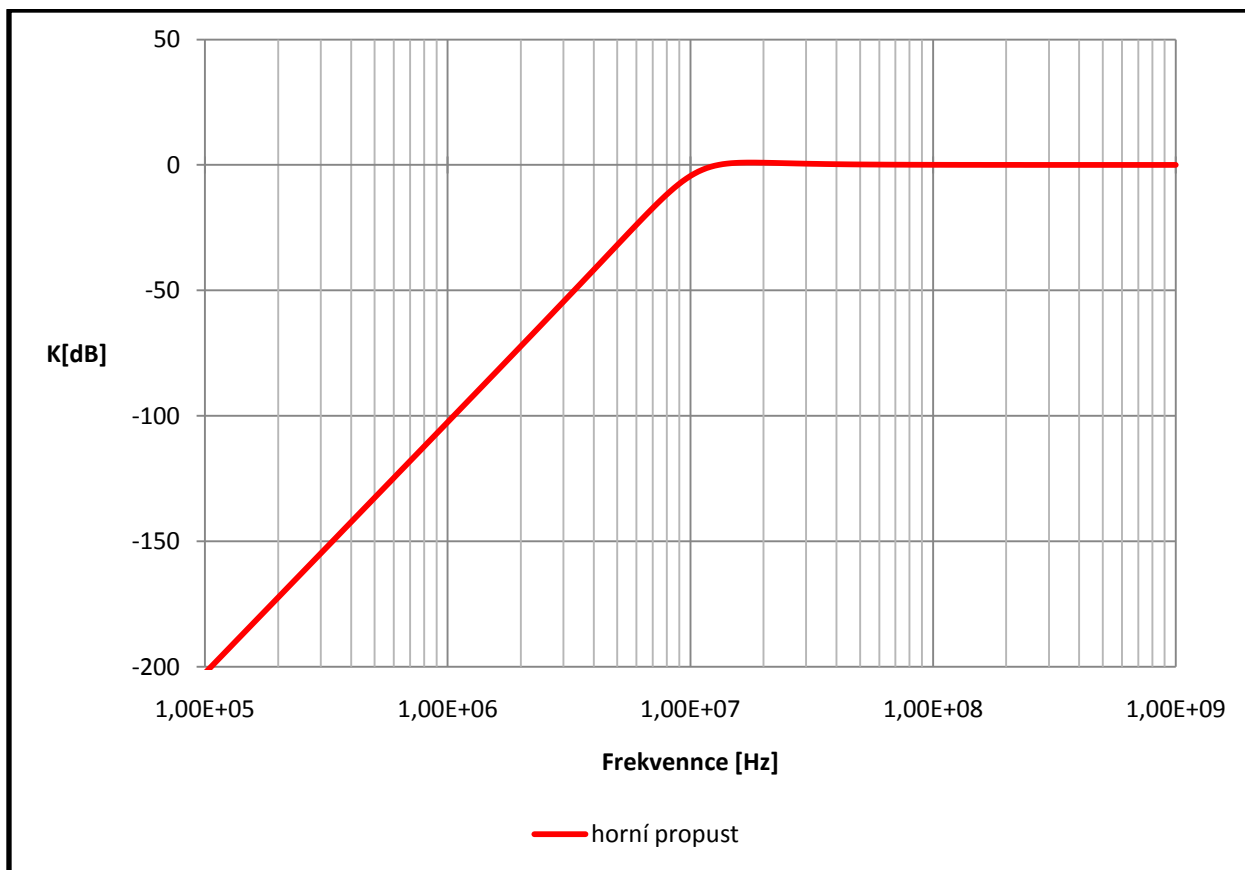
Pro výpočet pasivních součástek horní propusti 5.řádu použijeme stejný postup jako u výpočtu dolní propusti.

Zvolené hodnoty kondenzátorů jsou:  $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = C_6 = 100\text{pF}$ . Požadovaný mezní kmitočet  $f_m = 10\text{MHz}$ . K těmto hodnotám byli vypočítané hodnoty rezistorů:

$$R_6 = 1030\Omega, R_5 = 515\Omega, R_4 = 257,5\Omega, R_3 = 159,2\Omega, R_2 = 98,4\Omega, R_1 = 49\Omega$$

### 7.2.1 Přenosová funkce daného obvodu generovaná pomocí programu Snap[7]:

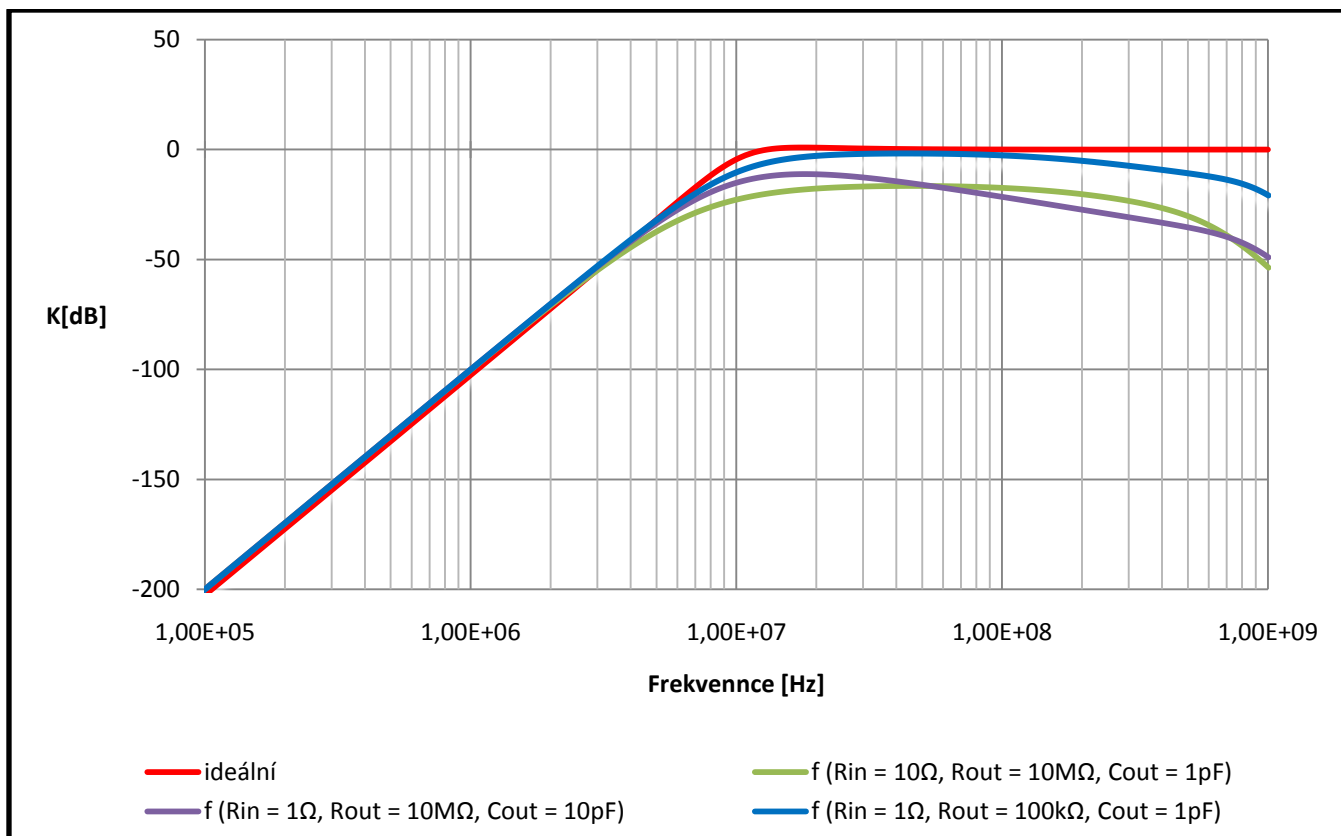
$$\begin{aligned}
 Ki(s) = & \frac{-s^5(R_6 * R_5 * R_4 * R_3 * R_2 * C_5 * C_4 * C_3 * C_2 * C_1)}{2 + s * (2 * R_2 * C_1 + 2 * R_3 * C_2 + 2 * R_5 * C_4 + 2 * R_4 * C_3)} \cdots \\
 & \frac{1}{\cdots + s^2 * (2 * R_4 * R_2 * C_3 * C_1 + 2 * R_4 * R_3 * C_3 * C_2 + 2 * R_5 * R_4 * C_4 * C_3 + 2 * R_3 * R_2 * C_2 * C_1)} \cdots \\
 & \frac{1}{\cdots * C_1 + 2 * R_5 * R_2 * C_4 * C_1 + 2 * R_5 * R_3 * C_4 * C_2 + 2 * R_6 * R_5 * C_5 * C_4)} \cdots \\
 & \frac{1}{\cdots + s^3 * (2 * R_4 * R_3 * R_2 * C_3 * C_2 * C_1 + 2 * R_5 * R_4 * R_2 * C_4 * C_3 * C_1 + 2 * R_5 * R_3 * R_2 * C_4 * C_2 * C_1)} \cdots \\
 & \frac{1}{\cdots * R_4 * R_3 * C_4 * C_3 * C_2 + 2 * R_6 * R_5 * R_2 * C_5 * C_4 * C_1 + 2 * R_5 * R_3 * R_2 * C_4 * C_2 * C_1 + 2 * R_6 * R_5 * R_3 * C_5 * C_4 * C_2)} \cdots \\
 & \frac{1}{\cdots + s^4 * (2 * R_5 * R_4 * R_3 * R_2 * C_4 * C_3 * C_2 * C_1 + 2 * R_6 * R_5 * R_3 * R_2 * C_5 * C_4 * C_2 * C_1 + 2 * R_6 * R_5 * R_4 * R_3 * C_5 * C_4 * C_3 * C_2)} \cdots \\
 & \frac{1}{\cdots + s^5 * (R_6 * R_5 * R_4 * R_3 * R_2 * C_5 * C_4 * C_3 * C_2 * C_1)} \cdots
 \end{aligned} \tag{7.11}$$



*Obr. 25 Graf horní propust 5.řádu*

Zapojení Obr.25 horní propust 5.řádu jsme podrobili AC analýze v programu Micro Cap. Simulace proběhla v rozsahu kmitočtu od 1MHz do 1GHz. Tímto jsme získali ideální kmitočtovou charakteristiku dle Obr.25.

Kmitočtová charakteristika vyšla podle teoretických předpokladů. Výsledný pokles je dán řádem filtru, kde každý z bloků má pokles o 20 dB/dek. Pro naše zapojení Obr.25, které je zapojeno jako horní propust 5. řádu je pokles dán  $n \cdot 20 \text{ dB/dek}$ , tudíž výsledný pokles je 100dB/dek. Hodnota mezního kmitočtu  $F_m$  při poklesu o -3dB v tomto případě nabývá hodnoty  $F_m=10 \text{ Mhz}$ .



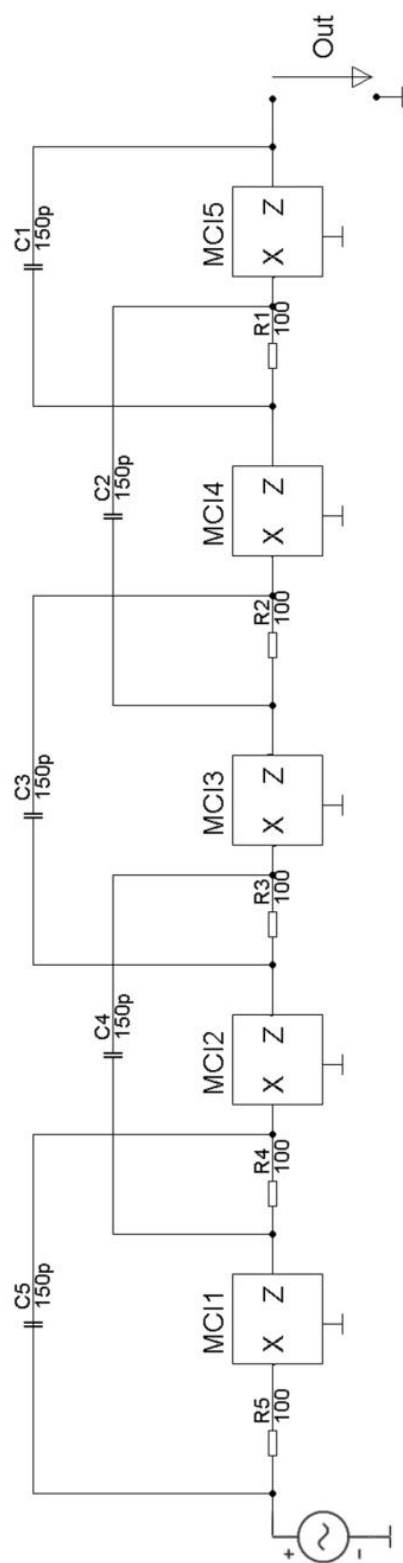
Obr. 26 Graf horní propust 5.řádu s parazitními prvky

Do grafu na Obr.26 jsem vynesl kmitočtové charakteristiky horní propusti 5 řádu s parazitními prvky aktivního proudového prvku CMI. V případě přenosové funkce  $f(R_{in} = 1\Omega, R_{out} = 100k\Omega, C_{out} = 1pF)$  zvýšení výstupního parazitního odporu  $R_{out}$  způsobí, že výsledná kmitočtová charakteristika má posunutý mezní kmitočet a z grafu na Obr.26 je patrné, funkce zůstává stabilně od mezního kmitočtu na -2dB a nezmenšuje svoji hodnotu zesílení až do 100MHz a potom pomali klesá.

Vliv vstupního parazitního odporu  $R_{in}$  který je v grafu na Obr.26 znázorněn funkcí  $f(R_{in} = 10\Omega, R_{out} = 10M\Omega, C_{out} = 1pF)$  je značný. Na výsledné kmitočtové charakteristice je patrný posun mezní frekvence. Při  $F_m = 10MHz$  zesílení -25dB.

Parazitní výstupní kapacita  $C_{out}$  v grafu na Obr.26 způsobí, že na zadané mezní frekvenci  $F_m = 10MHz$  je zesílení -23dB. A průběh funkce  $f(R_{in} = 1\Omega, R_{out} = 10M\Omega, C_{out} = 10pF)$  od této frekvence je patrný pokles zesílení asi 13dB/dek.

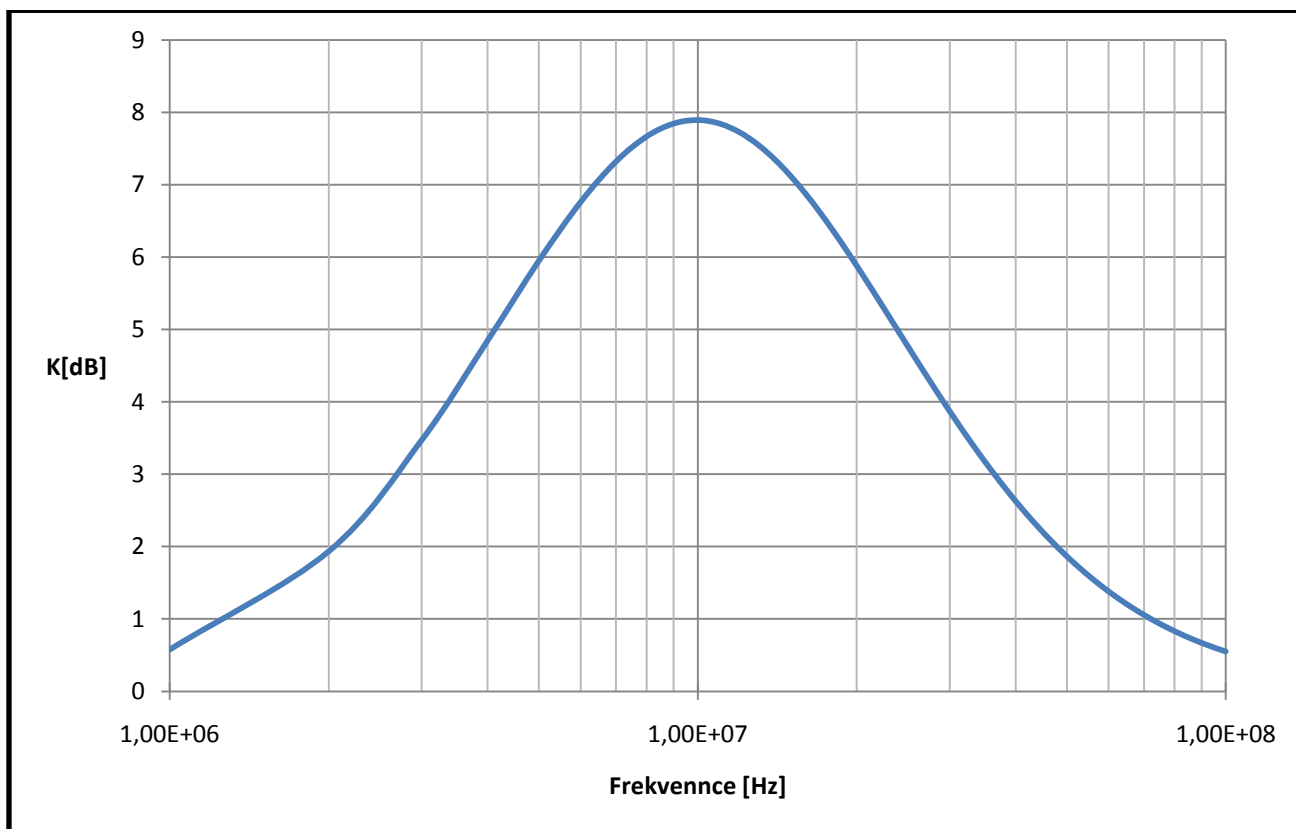
### 7.3 Pásmová propust:



Obr. 27 Schéma zapojení pásmová propust

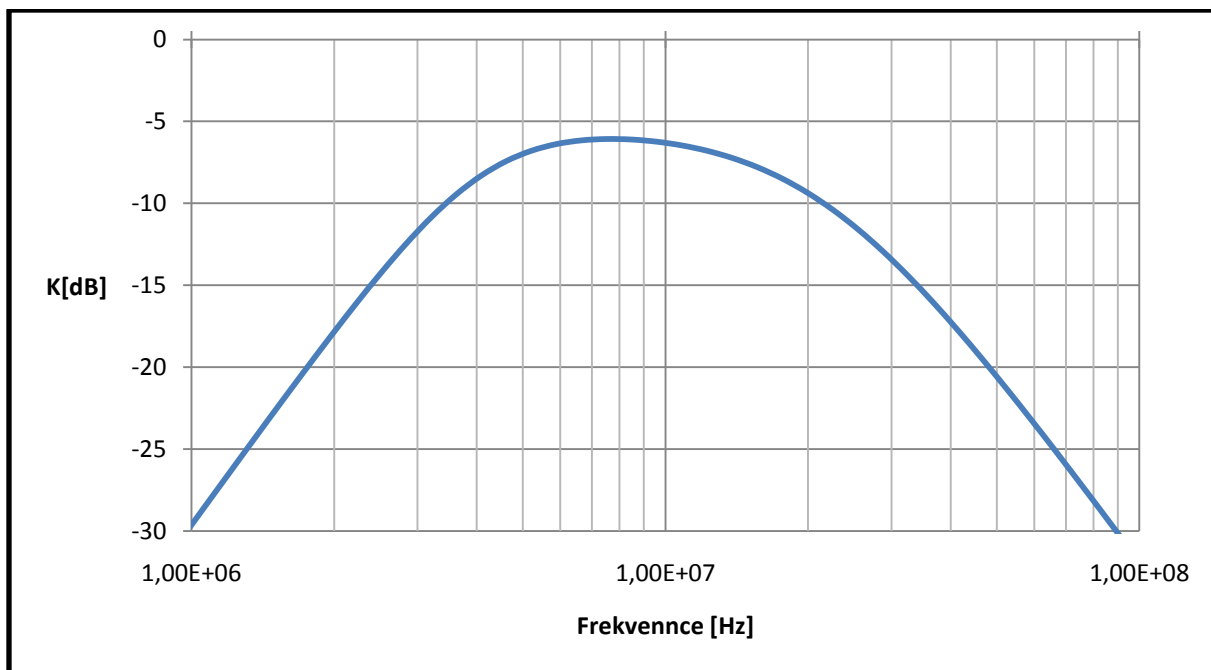


Za použití proudových aktivních prvků CMI a pasivních prvků R,C jsem vytvořil korekční obvod, který se svou kmitočtovou charakteristikou chová jako pásmová propust, která má na frekvenci 10MHz největší zesílení kmitočtového pásma.



*Obr. 28 Graf pásmová propust*

Na grafu Obr.28 je výsledná kmitočtová charakteristika pásmové propusti, která má mezní kmitočet  $F_m=10\text{MHz}$ . Na frekvenci 10MHz má průběh své maximum a hodnota zesílení se zde blíží 8dB. Po obou stranách křivka klesá od mezní frekvence  $F_m=10\text{MHz}$  do 2MHz strměji a poté klesá pozvolna.



*Obr. 29 Graf pásmová propust*

Spojením dolní propusti 2.řádu a horní propusti 2.řádu za sebe a dostaneme pásmovou propust 4.řádu. Mezní kmitočety v případě funkce na Obr.29 se blíží frekvenci 10MHz, kde je zesílení -6dB.



## 8 ZÁVĚR:

V této práci jsem se zabýval nekaskádními filtry s vícevýstupovými zrcadly. Na začátku práce jsem se zabýval teorií, která pojednávala o typech pasivních kmitočtových filtrů, kmitočtových filtrů vyšších řádů, proudovými aktivními prvky CMI, MCMI, GCMI a jejich využití v obvodech. Cílem bylo vytvořit filtry typu dolní propust, horní propust a pásmová propust s mezním kmitočtem  $F_M = 10\text{MHz}$  a hodnotou řádu  $n=5$ . K realizaci daných obvodů jsem si zvolil aktivní proudový prvek CMI a spolu s pasivními prvky R, C jsem vytvořil zapojení filtru typu dolní, horní a pásmová propust. Každé zapojení jsem podrobil simulacím v programu MicroCap a poté získaná data exportoval do programu Microsoft excel, kde jsem tyto data zpracoval v přehledné grafy. Výsledná kmitočtová charakteristika u obvodu typu dolní propust v zapojení bez parazitních prvků nám vyšla podle teoretických předpokladů s poklesem  $100\text{dB/dek}$ , který odpovídá zapojení filtru 5. řádu. Při poklesu  $-3\text{dB}$  jsme dosáhli mezního kmitočtu který je roven  $10\text{MHz}$ . Díky parazitním vlastnostem aktivních prvků CMI se nám tento ideální průběh zhoršil. Největší vliv na výslednou kmitočtovou charakteristiku má vstupní odpor  $R_{in}$ . Obvod typu horní propust se bez parazitních prvků chová podle teoretických předpokladů a výsledná kmitočtová charakteristika stoupá  $100\text{dB/dek}$ , který odpovídá zapojení filtru 5. řádu. Při poklesu  $-3\text{dB}$  jsme dosáhli mezního kmitočtu který je roven  $10\text{MHz}$ . Díky parazitním vlastnostem aktivních prvků CMI se nám tento ideální průběh zhoršil a stejně jako u zapojení dolní propusti nám výslednou kmitočtovou charakteristiku nejvíc ovlivňuje parazitní odpor  $R_{in}$ . Při realizaci pásmové propusti 5. řádu jsem vytvořil zapojení, které se chová jako korekční filtr, který na frekvenci  $10\text{MHz}$  má své maximum a na této frekvenci zesiluje téměř  $8\text{dB}$ . Mé další zapojení jak získat výslednou pásmovou propust 5. řádu bylo, že jsem za dolní propust 2. řádu zapojil horní propust 2. řádu, kde výsledná kmitočtová charakteristika je pásmová propust 4. řádu. Z nastudované teorie jsem pochopil, že pásmová propust je vždy jen sudého řádu.

Díky této práci jsem měl možnost nahlédnout hlouběji do problematiky filtrů vyšších řádů, rozšířil si a hodně se naučil o filtrech všeobecně.

## 9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:

- [1] VRBA, K., VRBA, K. Technika analogových obvodů a systémů, Skripta FEI VUT v Brně, Brno, 1987
- [2] HÁJEK, K., SEDLÁČEK, J. Kmitočtové filtry. Nakladatelství BEN - technická literatura, Praha 2002, 529 stran, ISBN 80-7300-023-7.
- [3] BIOLEK, D. Řešíme elektronické obvody, BEN, 2004, ISBN 80-7300-125-X
- [4] BIOLEK, Dalibor . *ELEKTRONICKÉ OBVODY I : učebnice*. Brno, 2006. 318 s. Skripta. VUT Brno. ISBN 80-7231-169-7.
- [5] JEŘÁBEK, J., VRBA, K. Kmitočtové filtry s univerzálním CMI [online]. Internetový časopis Elektrevue, dostupné z URL: [www.elektrevue.cz](http://www.elektrevue.cz)
- [6] JEŘÁBEK, J., KOTON, J., VRBA, K. Zobecněná metoda návrhu multifunkčních kmitočtových filtrů, [online], Internetový časopis Elektrevue, dostupné z URL: [www.elektrevue.cz](http://www.elektrevue.cz)
- [7] KOLKA, Z. Uživatelská příručka programu SNAP verze 3.02. Elektronická příručka programu, 2003, 39 s.
- [8] SEMMLER, P.: Filtry s vícevýstupovými proudovými zrcadly, Semestrální projekt, FEKT VUT v Brně, 2009, 37 stran.